

УДК 551.46

© П. Д. Ковалев, Д. П. Ковалев

Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, г. Южно-Сахалинск  
d.kovalev@imgg.ru**МОДУЛЯЦИЯ КОРОТКИХ ИНФРАГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ПРИЛИВОМ**

Статья поступила в редакцию 29.05.2017, после доработки 21.12.2017.

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН проводит регулярную регистрацию волнения в прибрежной зоне о. Сахалин и Курильских островов с целью изучения инфрагравитационных волн и опасных морских явлений с использованием автономных донных регистраторов волнения (колебаний уровня моря). Используемая в приборах односекундная дискретность позволяет записывать не только инфрагравитационные волны, но зыбь и ветровые волны без искажений. В результате многолетних наблюдений за уровнем моря удалось обнаружить явление модуляции инфрагравитационных волн приливом на шельфе о. Сахалин. Анализ по натурным данным и численным моделям морских поверхностных гравитационных волн показал, что в прибрежной зоне при нелинейном взаимодействии волна-волна происходит передача энергии от низкочастотных длинных волн назад, к более высокочастотным движениям. Это объясняет приливную модуляцию энергии инфрагравитационных волн, наблюдаемую в записях придонного давления на южном шельфе о. Сахалин. Полученные результаты подтверждают возможность использования модели Лонге-Хиггинса и Стюарта для определения коэффициентов увеличения амплитуды и периода инфрагравитационных волн как в прибойной зоне, так и за ее пределами. Подобные изменения приливных пляжей распространены во всем мире и таким образом, приливная модуляция инфрагравитационной энергии в прибойной зоне может быть эффектом прибрежных процессов и региональной сейсмической активности во многих районах прибрежной зоны. Изучение рассматриваемых здесь процессов важно, поскольку инфрагравитационные волны способствуют формированию береговой линии.

**Ключевые слова:** инфрагравитационные волны, модуляция приливом, зыбь.*P. D. Kovalev, D. P. Kovalev*

Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**MODULATION OF SHORT INFRAGRAVITY WAVES BY TIDE**

Received 29.05.2017, in final form 21.12.2017.

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS performs regular registration of sea waves in the coastal zone of Sakhalin Island and Kuril Islands for the purpose of investigating infragravity (IG) waves and dangerous marine phenomena using autonomous bottom wave loggers (sea level fluctuations). The one-second discreteness is used in devices and allows recording not only IG waves, but else swell and wind waves without distortion. As a result of long-term observations of sea level, it was possible to detect the phenomenon of IG waves modulation by the tides on the shelf of Sakhalin Island. Analysis from field data and numerical models of marine surface gravity waves showed that in the coastal zone the energy was transferred from the low-frequency waves to higher-frequency motions in the result of nonlinear wave-wave interaction. This explains the tidal modulation of the energy of the short infragravity waves, that was observed in the records of the bottom pressure on the southern shelf of the Sakhalin Island. The obtained results confirm the possibility of using the Longuet-Higgins and Stewart models for determining the coefficients for increasing the amplitude and the period of the IG waves both in the surf zone and outside it. Similar changes in tidal beaches are common throughout the world and thus, tidal modulation of IG energy in the surf zone can be an effect of coastal processes and regional seismic activity in many coastal areas. The study of the processes considered here is important, since IG waves contribute to the formation of the shoreline.

**Key words:** infragravity waves, tidal modulation, swell.Ссылка для цитирования: Ковалев П. Д., Ковалев Д. П. Модуляция коротких инфрагравитационных волн приливом // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 1. С. 21—27.For citation: *Kovalev P. D., Kovalev D. P. Modulation of short infragravity waves by tide. Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 1, 21—27.

DOI: 10.7868/S2073667318010021

Поверхностные инфрагравитационные (ИГ) волны с периодами от 20 до 200 с наблюдаются как в открытом океане [1], так и в прибрежной зоне [2, 3, 20] морей и океанов с максимальной энергией вблизи берега [4, 5]. В океанографии ИГ волны ответственны за разрушение берегов [6, 7], вызывают циркуляцию [8] и транспорт осадков [9]. В сейсмологии, колебания давления вследствие ИГ волн были идентифицированы в качестве важного источника микросейсмического шума на дне океана [1, 10]. В последнее время также предлагается, что ИГ волны являются источником непрерывных свободных колебаний Земли [11, 12].

Известно, что ИГ волны генерируются в результате нелинейного взаимодействия волн зыби или ветровых [13, 14]. Эти исследования нелинейного взаимодействия между короткопериодными волнами и течениями показали наличие модуляции ИГ волн с приливным периодом и обнаружили, что вариации энергии короткопериодных волн соответствуют работе, выполняемой течениями, за счет радиационного напряжения короткопериодных волн. Модулируемые приливом ИГ волны наблюдались и на внутреннем шельфе [15]. И так как приливные изменения в профилях пляжа распространены глобально [16] то, значит, приливная модуляция ИГ энергии в прибойной зоне может влиять на прибрежные процессы.

Хотя высокая корреляция наблюдалась между ИГ волнами и энергией океанских волн меньших периодов (ветровых волн и зыби) [2, 3, 5, 14], точный механизм генерации ИГ волн до сих пор не изучен [17]. И, поскольку остается еще много невыясненных вопросов как по генерации, так и модуляции ИГ волн, учитывая еще их влияние на прибрежную динамику, представляет интерес изучение этого явления по данным наших натуральных наблюдений.

В ИМГиГ ДВО РАН также были проведены многочисленные эксперименты по изучению ИГ волн в прибрежной зоне [18, 19] и во многих измерениях обнаружен эффект модуляции этих волн приливом. Результаты анализа данных наблюдений с использованием существующих моделей обсуждаются в настоящей работе.

**Данные наблюдений.** ИМГиГ ДВО РАН с 2010 по 2016 г. проводил изучение условий размыва побережья в районе с. Охотское, юго-восточное побережье о. Сахалин, с постановкой группы датчиков волнения с высокоточными пьезорезонансными преобразователями АРВ-14 в зоне размыва. В 2011 г. были установлены шесть приборов на период с июня по октябрь, в результате получены длинные временные ряды с дискретностью 1 с (рис. 1). На раме станции № 69 кроме измерителя волнения АРВ 14 также был установлен доплеровский измеритель скорости Sontek Argonaut XR.

Приливная модуляция ИГ волн наблюдалась нами для многих пунктов измерения в прибрежной зоне островов Курильской гряды и о. Сахалин. Однако в некоторых портовых бухтах волновое поле достаточно сложное, содержащее набор волн с собственными резонансными периодами, которые также

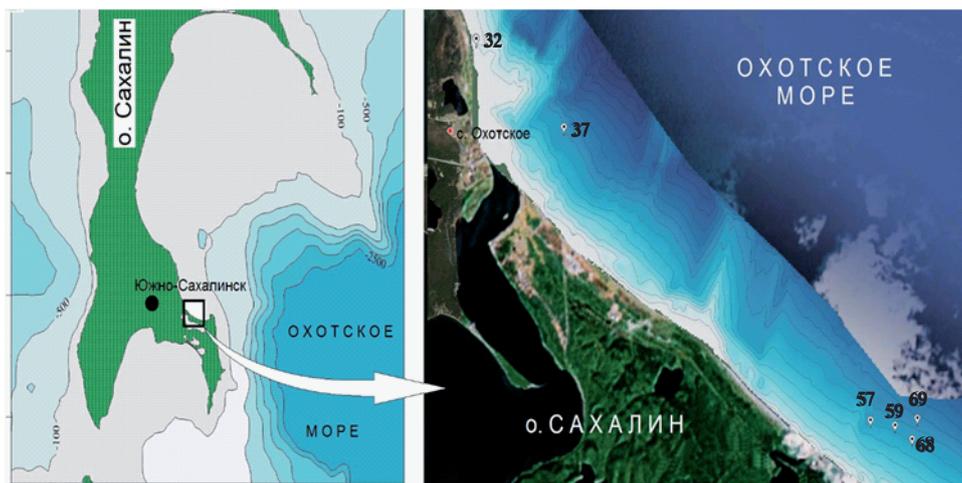


Рис. 1. Схема изучаемого участка юго-восточного побережья о. Сахалин. Показано положение автономных регистраторов волнения — донных станций.

Fig. 1. The scheme of the investigation area in the southeastern coast of Sakhalin Island. The position of autonomous of waves recorders — bottom stations is shown.

модулированы приливом. Поэтому для таких бухт анализ модуляции ИГ волн затруднен, и нами выбраны данные, полученные на открытом побережье вблизи с. Охотское, где берег близок к прямолинейному.

**Модуляция ИГ волн приливом.** Анализ текущих спектров в диапазоне ИГ волн от 20 до 200 с показал наличие модуляции ИГ волн приливом, что хорошо видно на рис. 2. Для обнаруженных ИГ волн с периодами около 28, 31, 45, 54 и 75 с в течение шести приливов и отливов были определены точные периоды на максимальной и минимальной воде. В результате было установлено, что период ИГ волн при максимальном приливе меньше, чем при отливе и составляет в среднем около 94 % при тенденции уменьшения при увеличении периода волн.

По измерениям волнения для станций № 32, № 68 и скорости течения для станции № 69 16—19 августа 2011 г. и диапазона ИГ волн были рассчитаны энергетические потоки по направлению распространения волн к берегу ( $F^+$ ) и в сторону моря ( $F^-$ ) с использованием результатов исследований работы [20] и выражению, приведенному в [21]:

$$F^\pm = \frac{\sqrt{gh}}{4} \int \left( PP + \frac{h}{g} UU \pm \sqrt{\frac{4h}{g}} PU \right) df, \quad (1)$$

где  $PP(f)$  и  $UU(f)$  является автоспектрами давления и поперечной береговой скорости соответственно,  $PU(f)$  — кроспектр давления и поперечной береговой скорости, интеграл — по частоте ( $f$ ) для диапазона ИГ волн ( $0.00625 < f < 0.05$  Гц). В линейном мелководном приближении групповая скорость  $C_g = \sqrt{gh}$ , где  $g$  — гравитационное ускорение,  $h$  — глубина воды. Рассчитанные вариации энергетических потоков ИГ волн с использованием (1) по двухчасовым записям, наблюдаемым на глубине 1.6 м коррелируется с полусуточным приливом (рис. 3).

Данный расчет был сделан для оценки изменения энергии приливно-отливных энергетических потоков ИГ волн с приливным циклом по полученным нами данным для Охотского моря и сравнения с результатами работы [21]. Также проверялся вывод работы [21], в которой приливную модуляцию объясняют разностью потерь энергии по приливу и отливу.

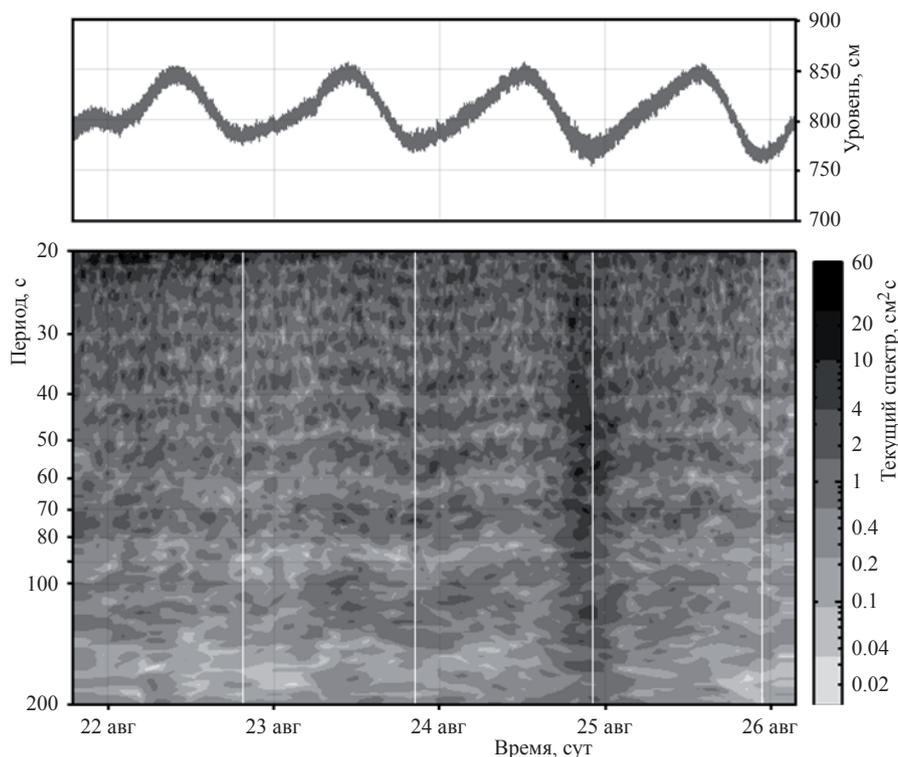


Рис. 2. Временной ход колебаний уровня моря с 22 по 26 августа 2011 г. в районе с. Охотское и текущий спектр для прибора № 68.

Fig. 2. The time series of sea level fluctuations at 22 to 26 August 2011 in the area of Okhotsk and spectrum for the bottom stations number 68.

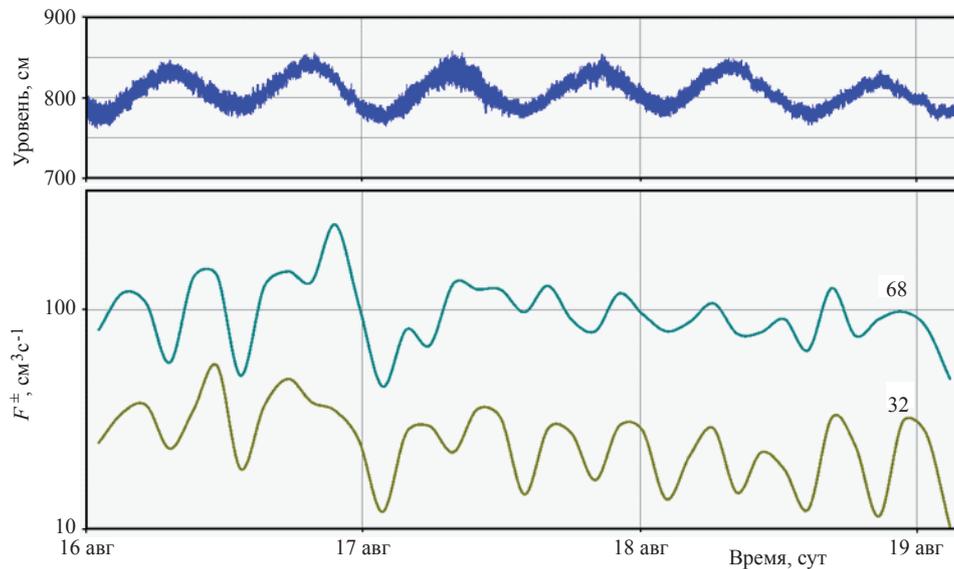


Рис. 3. Временной ход колебаний уровня моря на станции № 68 и энергетические потоки ИГ волн для станции № 32, установленной на глубине 1.6 м, и станции № 68, установленной на глубине около 8 м. Отлив соответствует минимальной воде, прилив — максимальной. Приливные колебания полусуточные, время между приливом и отливом около 6 ч.

Fig. 3. Energy flows of IG waves for station No. 32 installed at a depth about 1.6 m and station No. 68, installed at a depth of about 8 meters. Tidal fluctuations are semidiurnal.

Анализ наблюдений за приливной модуляцией на южном Калифорнийском побережье, представленный в работе [21] показал, что основной причиной увеличения потерь энергии по отливу являются потери в прибрежной зоне на донном профиле. Поэтому приливные колебания уровня моря по неоднородному пляжу вызывают приливные изменения ИГ энергии.

В результате проведенного нами исследования оказалось, что в отличие от выводов работы [21] в нашем случае уменьшение энергетических потоков ИГ волн наблюдается не только во время отлива, но и во время прилива. Тем не менее, в соседние с приливом отливы энергетические потоки ИГ волн были меньше.

Основываясь на выводах работы [21], можно заключить, что отличная от приведенной в ней картина изменения энергии ИГ волн с приливным циклом в нашей работе происходит с удвоенной частотой, по-видимому, в следствии отличия донных профилей и угла наклона дна в районе Калифорнийского побережья от Охотоморского побережья о. Сахалин. И, значит, основной причиной модуляции ИГ волн в нашем случае является изменение энергии коротких волн при работе более длинных волн против радиационного напряжения коротких волн, поскольку эффект наблюдается с приливным периодом [23].

Кроме оценки изменения энергии ИГ волн с приливо-отливным циклом, представляет интерес количественная оценка величины изменения амплитуды и волнового числа коротких ИГ волн. Это дает возможность определить диапазон изменения периодов ИГ волн, а поскольку они ответственны за образование ритмических форм рельефа, определить влияние модуляции на прибрежные литодинамические процессы. Поэтому далее будет рассмотрена модель, позволяющая количественно оценить диапазоны изменения параметров ИГ волн при модуляции.

**Модель.** Исследованием явления изменения длины коротких ИГ волн, когда они движутся по поверхности более длинных волн, результаты которых были опубликованы в серии работ 1941—1947 гг., занимался Р. J. Unna. Им было получено выражение для относительного сжатия длины короткой волны [22]. В последующем Лонге-Хиггинс и Стюарт строго вычислили изменения длины волны и амплитуды коротковолнового процесса, принимая во внимание нелинейные взаимодействия между двумя волновыми процессами [23]. Они показали, что изменение энергии коротких волн соответствует работе более длинных волн против радиационного напряжения коротких волн, которое ранее было упущено. Под радиационным напряжением волн понимается избыток потока импульса, вызванного ветровыми

волнами, а точнее их нелинейностью. В отечественной литературе его часто называют волновым напором [24].

И если короткие волны движутся не на равномерном течении, а на гораздо более длинных волнах, то чередование сжатия и расширения на поверхности более длинных волн приводит к работе против радиационного напряжения коротких волн. В [23] показано, что если эта работа предполагается в виде дополнительной энергии в коротких волнах, то должно быть изменение амплитуды коротких волн.

В работе [23] авторы использовали систему из трех уравнений, включающих скорость, давление, плотность, возвышение свободной поверхности и потенциал скорости. Первое уравнение связывает скорость с потенциалом скорости, второе является уравнением неразрывности и третье — интеграл Бернулли с произвольной функцией времени. К ним были добавлены граничные условия на дне. В результате было получено дифференциальное уравнение второго порядка для потенциала скорости и найдено его решение для потенциала скорости, удовлетворяющее граничным условиям и неразрывности.

После преобразований было получено решение для возвышения свободной поверхности второго порядка [23] для конечной глубины  $h$ , которое записывается в виде:

$$\zeta^{(2)} = a_1 a_2 k_1 / \alpha_1 [E \cos \psi_1 \cos \psi_2 + F \sin \psi_1 \sin \psi_2], \quad (2)$$

где  $E, F$  — коэффициенты, зависящие от  $\alpha_1 = \coth k_1 h$ ,  $\alpha_2 = \coth k_2 h$  и  $\lambda = \sigma_2 / \sigma_1 = T_1 / T_2$ ,  $\psi_1 = k_1 x - \sigma_1 t + \theta_1$ ,  $\psi_2 = k_2 x - \sigma_2 t + \theta_2$ , а  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  определяются из выражений:

$$\sigma_1^2 = g k_1 \tanh k_1 h, \quad \sigma_2^2 = g k_2 \tanh k_2 h.$$

На гребнях длинных волн, где  $a_2$  обозначает амплитуду и  $2\pi/k_2$ , длину волны длинных волн;  $h$  обозначает суммарную среднюю глубину. Индекс «1» обозначает принадлежность параметра к коротким волнам, индекс «2» — принадлежность к длинным волнам,  $a_1$  — среднее значение  $a'$ .

Из (2) после ряда преобразований и подстановок получаем коэффициент, на который увеличивается амплитуда короткой ИГ волны при модуляции

$$\frac{a'}{a_1} = 1 + a_2 k_2 \left( \frac{1}{4} \tanh k_2 h + \frac{3}{4} \coth k_2 h \right) \sin \psi_2, \quad (3)$$

и коэффициент увеличения волнового числа короткой ИГ волны:

$$\frac{k'}{k_1} = 1 + a_2 k_2 \coth k_2 h \sin \psi_2, \quad (4)$$

где  $k_1$  — среднее значение  $k'$ .

Так как в рассматриваемом нами случае  $T_1 \lambda h / T_2$  мало, уравнения (3), (4) сводятся к

$$\frac{a'}{a_1} = 1 + \frac{3a_2}{4h} \sin \psi_2, \quad (5)$$

$$\frac{k'}{k_1} = 1 + \frac{a_2}{h} \sin \psi_2 \quad (6)$$

соответственно.

Используя последние выражения, можно рассчитать коэффициенты увеличения волнового числа и амплитуды коротких ИГ волн при их модуляции приливной волной и сравнить с данными, полученными из экспериментов.

Расчет по выражениям (5), (6) для данных измерений 16—19 августа 2011 г. датчиком № 32 в районе с. Охотское при полусуточном приливе с  $a_2 = 0.175$  м,  $h = 1.6$  м показал максимальную величину  $k'/k_1 = 1.11$ . Из анализа текущего спектра, рассчитанного по данным натуральных наблюдений для 16—19 августа,  $k'/k_1 = 1.07$ , т. е. близкие величины для измерения в прибойной зоне и значит хорошее согласование с моделью Лонге-Хиггинса и Стюарта.

Для данных измерений 23—29 августа 2011 г. прибора № 68, установленного на расстоянии 870 м от берега, и суточном приливе расчет по модели с параметрами  $a_2 = 0.5$  м,  $h = 8$  м, показал максимальное значение  $k'/k_1 = 1.06$ . В то же время из анализа текущего спектра  $k'/k_1 = 1.18$ , т. е. достаточно близкие величины для измерения в прибрежной зоне.

Таким образом, для удаленного от берега прибора коэффициент увеличения волнового числа короткой ИГ волны при модуляции прилива, вычисленного по модели Лонге-Хиггинса и Стюарта

различается на 10.2 %, что по-видимому можно считать допустимым поскольку амплитуды коротких ИГ волн существенно зависят от энергии волн зыби, которая определяется синоптической ситуацией и может быстро и существенно изменяться во времени.

Рассчитанные по модели Лонге-Хиггинса и Стюарта значения коэффициента, на который увеличивается амплитуда короткой ИГ волны при модуляции составили 1.08 и 1.05 для глубин постановки приборов 1.6 и 8 м соответственно. По натурным данным для станции № 32 коэффициент увеличения амплитуды короткой волны для шести соседних полусуточных приливов и отливов  $a'/a_1 = 1.22-1.92$ . Для станции № 68 и суточного прилива  $a'/a_1 = 0.98-1.27$ . Таким образом тенденция уменьшения амплитудного коэффициента с глубиной прослеживается и по модели, и по натурным данным, хотя конечно натурные данные существенно изменчивы.

\*\*\*

С использованием модели волнового движения во втором приближении, предложенной в работе [23] и только по натурным данным выполнена количественная оценка коэффициентов увеличения амплитуды и волнового числа коротких ИГ волн, модулированных приливом. Показано, что коэффициенты, рассчитанные с использованием модели и из энергетических спектров колебаний уровня моря близки по величине. Так для станции, установленной в прибойной зоне на глубине 1.6 м коэффициент увеличения волнового числа короткой волны, рассчитанный по данным натурных наблюдений отличается от определенного по модели на 3.7 %, а для удаленной станции, установленной на глубине 8 м, на 10.2 %. Коэффициент увеличения амплитуды отличается на 12—44 и 7—17 % для ближнего и удаленного датчиков соответственно. Это подтверждает возможность использования модели Лонге-Хиггинса и Стюарта для определения коэффициентов увеличения как в прибойной зоне, так и за ее пределами.

Показано, что энергетические потоки в диапазоне ИГ волн уменьшаются как в отлив, так и в прилив, но в ототлив они меньше приливных. Это подтверждает вывод, сделанный в работе [21] о том, что основная причина в увеличение потерь энергии по отливу в прибрежной зоне на донном профиле вследствие нелинейного взаимодействия волн и величина потерь энергии существенно зависит от рельефа и наклона дна конкретного побережья, в нашем случае наблюдалось увеличение потерь энергии ИГ волн и при приливе. Так же установлено, что модуляция приливом наблюдается для всех мод ИГ волн в диапазоне периодов 20—200 с.

Анализ по натурным данным и численным моделям морских поверхностных гравитационных волн показывает, что в прибрежной зоне при нелинейном взаимодействии волна-волна происходит передача энергии от низкочастотных длинных волн назад к более высокочастотным движениям. Это объясняет приливную модуляцию энергии ИГ волн, наблюдаемую в записях придонного давления на южном шельфе о. Сахалин. Подобные приливные изменения в профилях пляжа распространены во всем мире [16], и, значит, приливная модуляция ИГ энергии в прибойной зоне может быть обуславливать различные эффекты прибрежных процессов и региональной сейсмической активности.

### Литература

1. *Webb S. C., Zhang X., Crawford W.* Infragravity waves in the deep ocean // *J. Geophys. Res.*, 1991, 96, P. 2723—2736.
2. *Munk W. H.* Surf beats // *Eos Trans. AGU*. V. 30. P. 849—854.
3. *Tucker M. J.* Surf beats: Sea waves of 1 to 5 min. period // *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 1959. V. 202. P. 565—573.
4. *Guza R. T., Thornton E.* Observations of surf beat // *J. Geophys. Res.*, 1985. V. 90. P. 3161—3172.
5. *Elgar S., Herbers T. H. C., Okinhiro M., Oltman-Shay J., Guza R. T.* Observations of infragravity waves // *Journal of Geophysical Research*, 1992. N. 97. P. 573—577.
6. *Леонтьев И. О.* Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
7. *Рабинович А. Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Л.: Гидрометеиздат, 1993. 325 с.
8. *Kobayashi N., Karjadi E.* Obliquely incident irregular waves in surf and swash zones // *Journal of Geophysical Research*. 1996. N. 101. P. 6527—6542.
9. *Holman R. A., Bowen A. J.* Bars, bumps and holes: Models // *Journal of Geophysical Research*. 1982. N. 87. P. 749—765.
10. *Webb S. C.* Broadband seismology and noise under the ocean // *Reviews of Geophysics*. 1998. N. 36. P. 105—142.
11. *Rhie J., Romanowicz B.* Excitation of Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling // *Nature*. 2004. N. 431. P. 552—556.
12. *Tanimoto T.* The oceanic excitation hypothesis for the continuous oscillation of the Earth // *Geophysical Journal International*. 2005. N. 160. P. 276—288.
13. *Longuet-Higgins M., Stewart R.* Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to surf beats // *Journal of Fluid Mechanics*. 1962. N. 13. P. 481—504.

14. *Herbers T. H. C., Elgar S., Guza R. T.* Generation and propagation of infragravity waves // *Journal of Geophysical Research*. 1995. N. 100. P. 863—872.
15. *Okiihiro M., Guza R. T.* Infragravity energy modulation by tides // *Journal of Geophysical Research*. 1995. N. 100. P. 143—148.
16. *Woodroffe C. D.* *Coasts: Form Process and Evolution*. Cambridge Univ. Press, New York, 2002. 623 p.
17. *Dolenc D., Romanowicz B., Stakes D., McGill P.* Observations of infragravity waves at the Monterey ocean bottom broadband station (MOBB) // *Journal Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2005. V. 6, N. 9. P. 134—155.
18. *Ковалев П. Д., Шевченко Г. В., Ковалев Д. П.* Исследование динамики прибойных биений у юго-восточного побережья о. Сахалин // *Метеорология и гидрология*, 2006. № 9. С. 76—87.
19. *Ковалев П. Д., Ковалев Д. П.* Исследование особенностей генерации инфрагравитационных волн в прибрежной зоне моря // *Вестник ДВО РАН*. 2013. Т. 3. С. 60—64.
20. *Sheremet A., Guza R.T., Elgar S., Herbers T. H. C.* Observations of nearshore infragravity waves: Seaward and shoreward propagating components // *Journal of Geophysical Research*. 2002. 107(C8). 3095. doi: 10.1029/2001JC000970.
21. *Thomson J., Elgar S., Raubenheimer B., Herbers T. H. C., Guza R. T.* Tidal modulation of infragravity waves via nonlinear energy losses in the surfzone // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33, L05601, P.1—4. doi: 10.1029/2005GL025514.
22. *Unna P. J.* Sea waves // *Nature*. 1947. N. 159. P. 239—242.
23. *Longuet-Higgins M. S., Stewart R. W.* Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents // *Journal of Fluid Mechanics*. 1960. N. 8. P. 565—583.
24. *Матушевский Г. В.* Радиационное напряжение (волновой напор) и средний волновой уровень нерегулярных трехмерных волн в прибрежной зоне // *Изв. АН СССР, ФАО*. 1975. Т. 11, № 1. С. 75—82.